Uticaj oblika osnove membranskih konstrukcija na pomeranja pod dejstvom koncentrisane sile

VUK S. MILOŠEVIĆ, Univerzitet u Nišu,
Građevinsko-arhitektonski fakultet, Niš
BISERKA LJ. MARKOVIĆ, Univerzitet u Nišu,
Građevinsko-arhitektonski fakultet, Niš

Originalni naučni rad
UDC: 624.042.7
DOI: 10.5937/tehnika1602187M

Membranske konstrukcije se pod uticajem spoljašnjeg opterećenja deformišu mnogo više u odnosu na druge tipove konstrukcija i konstruktivnih materijala. Osim što izazivaju velika pomeranja, površinska spoljašnja opterećenja dovode i do preraspodele sila zatezanja u membrani. Koncentrisane sile imaju manji uticaj na promenu sila zatezanja, ali značaj na pojavu lokalnih deformacija. Dosadašnja istraživanja pokazala su uticaj pozicije i intenziteta koncentrisanih sila na deformacije membrana. U ovom radu prikazano je istraživanje koje se bavi uticajem oblika i veličine osnove membranske konstrukcije na pomeranja pod koncentrisanom silom. Istraživan je uticaj rombičnog oblika različitih odnosa i dužina dijagonala. Ispitivanje je izvršeno na numeričkim modelima u specijalizovanom softveru Sofistik. Modeli su opterećivani koncentrisanim silama u preseku dijagonala i maksimalna pomeranja su zatim međusobno upoređivana.

Ključne reči: membranske konstrukcije, pomeranja, oblik osnove, numerički model, koncentrisana sila, zategnute konstrukcije

1. UVOD

Membranske konstrukcije imaju malu masu i malu krutost, pa se protiv dejstva spoljašnjih sila bore promenom geometrije i preraspodelom sila zatezanja u membrani. Dejstvo spoljašnjih sila dovodi do mnogo većih deformacija nego što je to slučaj kod drugih tipova konstrukcija i drugih konstruktivnih materijala. Zbog toga, promena geometrije ima veoma veliki značaj kod membranskih konstrukcija. Uprkos velikim deformacijama koje se javljaju kod membrana, nacionalni standardi [1] i evropska uputstva za projektovanje membranskih konstrukcija [2] ne daju ograničenja u pogledu maksimalnih deformacija pod spoljašnjim opterećenjem, tako da projektanti ovih konstrukcija još uvek nemaju zvanične smernice u pogledu deformacija na konkretnim konstrukcijama. Najveća opasnost pri ovim deformacijama nisu prevelika izduženja materijala, već mogućnost da dođe do oštećenja membrane zbog kontakta sa drugim površinama. Druga opasnost je moguća pojava mesta

sa kojih voda ne bi mogla da otiče zbog nepovoljne zakrivljenosti površine [3, 4]. Pri proveru maksimalnih deformacija projektanti konstrukcije se uglavnom oslanjaju na prethodna iskustva iz prakse. Istraživanje predstavljeno u ovom radu je deo većeg istraživanja koje se bavi ispitivanjem uticajnih faktora na deformacije membranskih konstrukcija, i ima za cilj da pomogne donošenju pravilnika iz ove oblasti.

Uobičajena spoljašnja dejstva na koja se proračunavaju membranske konstrukcije su dejstva snega i vetra [5]. To su površinska opterećenja kod kojih se pre svega proverava da li je došlo do prekoračenja sila zatezanja u membrani.

U poslednje vreme pošlo se i za primenom fotonaponskih i sličnih panela, koji se postavljaju na membranu i koje takođe treba uzeti u obzir u proračunu [6]. Osim snega i vetra, na membranu isto deluju i koncentrisane sile.

One najčešće nemaju veliki uticaj na pomeranje sila zatezanja u membrani, ali izazivaju velike lokalne deformacije. Koncentrisane sile u praksi nastaju od radnika koji održavaju ili montiraju membranu, od opreme koja je oslonjena na membranu ili od veze između slojeva kod višeslojnih membrana. Upravo pomeranja membrana koja nastaju kao posledica dejstva jedne koncentrisane sile tema su ovog rada.

Adresa autora: Vuk Milošević, Univerzitet u Nišu,
Građevinsko arhitektonski fakultet, Niš, Aleksandra
Medvedeva 14

Rad primljen: 19.01.2016.

Rad prihvaćen: 01.03.2016.

Postoji puno parametara koji utiču na to koliko će biti pomeranja membranske konstrukcije pod dejstvom spoljašnje sile. Ove parametre možemo podeliti na grupu parametara koji su vezani za opterećenje koje deluje na konstrukciju, grupu koja je vezana za karakteristike membranskog materijala i grupu koja je vezana za oslonce. U ovom radu prezentovan je uticaj oblika osnove na pomeranja membrana pod dejstvom koncentrisane sile. Ovaj parametar spada u grupu parametara vezanih za oslonce. Geometrija oslonaca određuje formu membranskih konstrukcija [7].

Membrane sedlastog oblika u najvećem broju slučajeva formiraju kvadratne ili približno kvadratne osnove. Osim ove, u primeni se nalaze i deltoidne forme osnove, dok su drugi oblici osnove nepraktični zbog dvostruke zakrivljenosti sa negativnom Gausovom krivinom, koju membrane poseduju.

Postoje objavljena istraživanja koja se tiču velikih deformacija membranskih konstrukcija [8-10]. Jedno istraživanje bavi se deformacijama gumene membrane pod dejstvom koncentrisane sile [11].

Međutim, u graditeljstvu se pre svega koriste tekstilne membrane [12]. Objavljeno je i istraživanje koje se bavi uticajem pozicije i intenziteta koncentrisane sile na deformacije membrane [13]. Takođe, pokazano je da velike deformacije mogu da imaju i pozitivnu ulogu kod membrana [14]. Prema saznanjima autora ovog rada, ispitivanje uticaja oblika osnove na pomeranja membranskih konstrukcija pod dejstvom koncentrisane sile na način prikazan u ovom radu do sada nije vršeno.

2. METODOLOGIJA

Istraživanje prikazano u ovom radu izvršeno je na numeričkim modelima u softverskom paketu Sofistik 2016 [15]. Cilj istraživanja je bio da se utvrdi koliko je razlika u pomeranjima pod dejstvom koncentrisane sile pri različitim oblicima osnove. Kao osnovni oblik osnove uzet je kvadrat stranica 5x5 metara.

Dva naspramna temena kvadrata su podignuta za 1,5 m u odnosu na druga dva temena. Ivi ni oslonci su modelovani kao kruti i nepomerljivi. U praksi se često kao ivi ni oslonci koriste i kablovi, ali u ovom istraživanju nisu modelovani da bi se izbegao uticaj prednaprezanja kablova na posmatrane rezultate.

Usvojena sila prednaprezanja u membrani iznosi 3 kN/m u oba glavna pravca membrane. Membrana je podeljena na 100 koničnih elemenata i modelovana sa sledećim karakteristikama: modulo elastičnosti 600 N/mm² u oba glavna pravca, modulo smicanja 5 N/mm², Poasonov koeficijent 0,3 u oba glavna pravca, i debljina membrane 1 mm. Pravci vlakana u membrani paralelni su dijagonalama. Sa ovim ulaznim parametrima izvršen je proces dobijanja početne forme

membrane, tzv. Formfinding. Formfinding je proces karakterističan za membranske konstrukcije [16-18]. Dobijena forma osnovnog modela prikazana je na slici 1.

Slika 1 – Izgled modela sa kvadratnom osnovom dimenzija 5x5 m

Dobijeni model opterećen je vertikalnom koncentrisanom silom. Intenzitet sile je variran od 0,1 do 1,0 kN, a za poziciju dejstva sile usvojena je tačka preseka dijagonala, u kojoj je određeno pomeranje membrane u pravcu dejstva sile. Ova pozicija uzeta je kao najpogodnija jer daje uporedive rezultate između modela koji imaju različite oblike osnova. Proračun membrane se u programu vrši po teoriji trećeg reda.

Prvi deo istraživanja osmišljen je tako da ispituje uticaj promene oblika osnove iz rombične u kvadratnu i obrnuto. Korišćene su forme romba, kao specijalnog slučaja deltoida, zbog njihove lakoće upotrebe u praksi. Za druge forme deltoida ovo istraživanje bi trebalo proširiti. Modelovano je 7 različitih modela konstrukcija. Razlike između ovih modela ogledaju se samo u različitom obliku osnove.

Temena se nalaze na istim visinama kao i kod osnovnog modela, ali se rastojanje između dva podignuta temena povećava od modela do modela. Osnove ovih modela date su na slici 2. Podignuti oslonci kod svih modela na slici su gornji i donji, dok su levi i desni niži oslonci.

Najmanji model A1 ima dijagonale dužine 4,07 i 7,07 m, i kod svakog sledećeg modela prva dijagonala je povećavana za 1 m, tako da poslednji model A7 ima dimenzije dijagonala 10,07 i 7,07 m. Središnji model A4 je sa kvadratnom osnovom 5x5 m i ima dijagonale od 7,07 i 7,07 m. Koncentrisana sila kod svih modela deluje u preseku dijagonala membrane. Očekuje se da će rezultati ovog dela istraživanja pokazati da postoji velika razlika u pomeranjima između modela grupe A.

Drugi deo istraživanja je sličan prvom, s tim što za razliku od prvog dela istraživanja gde je dimenzija jedne dijagonale varirana, a dimenzija druge dijagonale bila fiksna, ovde su varirane dimenzije obe dijagonale.

To je izvedeno na takav način da je površina osnove uvek približno ista. Modelovano je 7 različitih rombičnih konstrukcija, tako da su dimenzije

dijagonala izme u nižih i viših oslonaca, redom, kod modela: B1 10 i 5 m, B2 9 i 5,55 m, B3 8 i 6,25 m, B4 7,07 i 7,07 m, B5 6,25 i 8 m, B6 5,55 i 9 m, B7 5 i 10 m. Ovi modeli prikazani su na slici 3. O ekuje se da e

rezultati pokazati da izme u modela ove grupe postoje razlike u maksimalnim pomeranjima pod dejstvom koncentrisane sile. Ove razlike bi trebalo da budu manje nego izme u modela iz grupe A.

Slika 2 – Modeli iz grupe A

Slika 3 – Modeli iz grupe B

Slika 4 – Modeli iz grupe C

Tre i deo istraživanja ispituje uticaj razli itih veli ina kvadratnih osnova na pomeranje pod dejstvom koncentrisane sile. U tu svrhu tako e je formirano 7 modela. Model C1 ima dimenzije dijagonala 4,07 i 4,07 m, a kod svakog narednog modela dimenzije dijagonala su pove avane za po 1 m, tako da model C7 ima dijagonale dimenzija 10,07 i 10,07 m. Modeli A4, B4 i C4 su potpuno identit ni i oni odgovaraju osnovnom modelu koji je definisan na po etku ovog poglavlja. Modeli iz grupe C prikazani su na slici 4.

O ekuje se da e pomeranja rasti od modela C1 ka modelu C7 i da e razlike pomeranja biti zna ajne.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Ukupno 19 modela analizirano je na 190 slu ajeva optere enja. Na ovaj na in dobijeno je preko 15000 rezultata za pojedina ne ta ke na ovim modelima.

Me utim, kako je ranije ve dokazano da se maksimalne deformacije javljaju ta no na mestu gde deluje koncentrisana sila, u ovom radu e biti predstavljeni rezultati za ta ke u preseku dijagonala svih membrana.

Dijagram pomeranja membrane pod dejstvom koncentrisanog optere enja od 1 kN kod osnovnog modela dat je na slici 5. Ovaj primer dobro ilustruje ponašanje i ostalih modela pri dejstvu koncentrisane sile. Uo lljivo je da su pomeranja vrlo skoncentrisana oko mesta delovanja sile, i da ve i deo membrane trpi samo minimalna pomeranja.

Slika 5 – Pomeranja u osnovnog modela u mm pod dejstvom koncentrisane sile od 1,0kN

Rezultati maksimalnih pomeranja za modele iz grupe A pod dejstvom različitih intenziteta koncentrisanih sila dati su grafikom na slici 6. Grafik je dat kao trodimenzionalan i površinski, i prikazuje maksimalna pomeranja svih modela za sve ispitivane intenzitete sile. Rezultati analize modela iz grupe B dati su tabelarno u tabeli 1 zbog bolje preglednosti. Razlike u maksimalnim pomeranjima kod ove grupe su manje nego kod grupe A pa zbog toga nisu date grafički. Rezultati za grupaciju C dati su na slici 7, po istom principu kao i rezultati za grupu A.

Kod rezultata vezanih za grupu A najpre je primetno da je odnos između u ispitivanih karakteristika nelinearan. Nelinearnost postoji i u odnosu između intenziteta sile i maksimalnih pomeranja, ali i u odnosu između u ispitivanih oblika osnova i maksimalnih pomeranja. Povećanje intenziteta sile dovodi do većeg povećanja pomeranja nego analizirana promena oblika osnove. Najmanja pomeranja pod dejstvom sile pokazuje model A1, što je i bilo očekivano. Sa svakim sledećim modelom maksimalna pomeranja nelinearno rastu, pa tako najveća pomeranja ima model A7. Razlika u pomeranjima između modela A1 i A7 je procentualno najmanja pri dejstvu sile od 0,1 kN i iznosi oko 20% (redom 9,6 mm i 12,1 mm), a najveća pri dejstvu sile od 1,0 kN i iznosi oko 40% (redom 62,5 mm i 101,1 mm). Ovakvi rezultati odgovaraju očekivanjima jer je bilo moguće pretpostaviti da se udaljšavanje dva podignuta temena dovesti do povećanja pomeranja.

Modeli iz grupe B pokazuju manje pravilnosti u odnosu na grupu A. Od modela B1 do modela B5 pomeranja rastu, a potom opadaju do modela B7. Razlika između najvećeg i najmanjeg pomeranja pri intenzitetu sile od 0,1 kN je oko 13%, a pri intenzitetu sile od 1,0 kN oko 24%. Od modela B4 do B7 razlike u pomeranjima su jako male i ne prelaze 10%. Generalno, kod grupe modela B razlike u pomeranjima pri istom intenzitetu sile su manje nego što je bilo očekivano. Očigledno je da udaljšavanje viših temena osnove uz istovremeno približavanje nižih temena ima manji uticaj na povećanje pomeranja u poređenju sa udaljšavanjem viših temena uz zadržavanje istog odstojanja između u nižih.

Modeli iz grupe C pokazuju pravilno ponašanje koje je slično ponašanju modela iz grupe A. Kod modela sa kvadratnom osnovom različitih dimenzija povećanje pomeranja odigrava se nelinearno i sa povećanjem intenziteta sile i sa povećanjem dimenzije osnove. Pomeranja modela su vrlo slična odgovarajućim modelima iz grupe A pod istim opterećenjem. Zato su i razlike u maksimalnim pomeranjima između modela grupe C skoro iste kao i kod grupe A i između C1 i C7 iznose oko 25% (redom 9,8 mm i 12,9 mm) pri opterećenju od 0,1 kN, odnosno oko 40% (redom

65,0 mm i 106,9 mm) pri opterećenju od 1,0 kN. Ovakvo ponašanje membrana je i bilo očekivano jer je prirodno da povećanje veličine osnove dovede do povećanja pomeranja.

Slika 6 – Maksimalna pomeranja modela grupe A

Slika 7 – Maksimalna pomeranja modela grupe C

Analizom dobijenih rezultata može se doći do nekoliko zaključaka. Oblik osnove membranske konstrukcije nije direktno važan za pomeranja pod dejstvom koncentrisane sile, već se njegov uticaj ispoljava indirektno kroz druge dve karakteristike: raspon i zakrivljenost konstrukcije. Rasponi konstrukcije direktno su vezani za veličinu osnove, pa na taj način i za oblik osnove. Od raspona i zakrivljenosti direktno zavisi dužina vlakana membrane. Poznato je da se membranske konstrukcije izводе od tekstilnog materijala koji ima vlakna u dva međusobno ortogonalna pravca.

U slučaju dejstva spoljašnjeg opterećenja vlakna jednog pravca se generalno izdužuju, a vlakna drugog pravca skraćuju. Skraćivanje je moguće zbog toga što su ona prethodno već bila izdužena pod dejstvom sile prednaprezanja, koja je kod membrana uvek zatežuća. Što je već dužina vlakna, to je i izduženje, odnosno

pomeranja biti veća. Tako je veća zakrivljenost vlakana koja primaju opterećenje, to je manja promena geometrije biti neophodna da konstrukcija dođe u ravnotežu.

Tabela 1. Maksimalna pomeranja modela grupe B pod dejstvom različitih intenziteta sile (mm)

Sila (kN)	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
0,1	10.07	10.682	11.27	11.625	11.627	11.29	10.785
0,2	19.245	20.529	21.859	22.814	23.085	22.606	21.666
0,3	27.541	29.51	31.641	33.316	33.995	33.46	32.114
0,4	35.073	37.707	40.642	43.061	44.179	43.608	41.871
0,5	41.974	45.25	48.945	52.096	53.63	53.017	50.917
0,6	48.355	52.235	56.654	60.474	62.407	61.735	59.31
0,7	54.304	58.757	63.859	68.31	70.592	69.87	67.167
0,8	59.892	64.887	70.637	75.672	78.259	77.51	74.58
0,9	65.174	70.683	77.05	82.617	85.498	84.733	81.606
1,0	70.171	76.171	83.114	89.201	92.371	91.61	88.328

U grupi modela A model A1 ima najmanje rastojanje izmeću podignutih temena osnove. Vlakna koja idu od jednog ka drugom podignutom temenu biće direktno opterećena delovanjem koncentrisane sile u preseku dijagonala membrane. Dužina ovih vlakana je kod modela A1 najmanja. Istovremeno, zakrivljenost ovih vlakana je veća u poređenju sa ostalim modelima grupe A. Svaki sledeći model u grupi A ima sve veću dužinu vlakana koja se prostiru izmeću viših temena osnove, ali je takođe i njihova zakrivljenost sve manja zbog toga što razlika u visini izmeću viših i nižih oslonaca nije menjana.

Iako se vlakna najviše izdužuju neposredno oko mesta delovanja sile, i ostatak vlakna takođe se pod dejstvom spoljašnje sile izdužuje, ali u znatno manjoj meri. Model A1 ima najmanja pomeranja, a A7 najveća, što potvrđuje prethodno dato objašnjenje o uticaju zakrivljenosti i dužine vlakana na pomeranja.

Iako se, gledajući samo osnovu, može stići do utisak da su modeli B1 i B7 isti, samo rotirani za 90° oko vertikalne ose, te da bi trebalo da imaju ista pomeranja, to nije slučaj, pa ni njihova pomeranja nisu ista. Ovi modeli imaju suprotan raspored viših i nižih oslonaca, tako da bi oni zapravo bili isti ukoliko bi jedan od njih rotirali oko horizontalne ose za 180°. Isto važi i za parove B2 i B6, i B3 i B5. Dok izmeću modela iz grupe A ne postoji velika razlika u zakrivljenju i dužini vlakana koja se nalaze izmeću nižih oslonaca, kod grupe B postoje znatne razlike. Od B1 ka B7 zakrivljenost vlakana koja povezuju niže oslonce raste, a njihova dužina opada, dok vlakna koja povezuju više oslonce imaju analogne karakteristike onima iz grupe A. Ovakva pojava posledica je izmeštanja svih četiri temena osnove. Samo udaljavanje viših oslonaca treba da dovede do povećanja pomeranja, što je već pokazano na modelima grupe A. Međutim kod grupe B uvodi se dodatni efekat, smanjivanje rastojanja

izmeću nižih oslonaca. Zbog razlike u rezultatima izmeću grupa A i B oigledno je da i vlakna koja povezuju niže oslonce imaju ulogu u određivanju maksimalnih pomeranja. Kod modela grupe A sa povećanjem udaljenosti viših oslonaca povećanje pomeranja se smanjuje kod svakog sledećeg modela, a kod grupe B ovo povećanje počinje od modela B5 prelazi u smanjivanje pomeranja. Ova promena ponašanja izazvana je uticajem skraćivanja dužine vlakana izmeću nižih oslonaca kod svakog narednog modela.

Modeli iz grupe C sa osnovom kvadratnog oblika različitih veličina tokom analize dali su rezultate koji potvrđuju tačnost objašnjenja primenjenog na rezultate prethodnih grupa. Naime, povećanjem veličine osnove oblika kvadrata menja se raspon konstrukcije, time i dužina vlakana, ali ne i odnos dijagonala. Takođe, budući da se povećava veličina osnove, a da oslonci ostaju na istim visinama, zakrivljenost konstrukcije se smanjuje. Povećanje dužine vlakana i smanjenje zakrivljenosti konstrukcije treba da dovede do povećanja pomeranja, što je rezultatima grupe C još jednom potvrđeno.

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljeno je istraživanje uloge oblika osnove membranske konstrukcije na pomeranja pod dejstvom koncentrisane sile. Ispitivanje je izvršeno na numeričkim modelima u softveru Sofistik 2016. Ispitivane su rombične i kvadratne forme manjih i srednjih raspona. Formirane su tri grupe modela, pri čemu su sve njihove karakteristike, osim oblika i veličine osnove, bile konstantne.

Modeli su izloženi dejstvu koncentrisane sile i dobijena pomeranja su međusobno upoređivana. Rezultati istraživanja su pokazali da oblik osnove ima uticaja na maksimalna pomeranja pod koncentrisanom

silom. Ovaj uticaj se ispoljava posredno, preko zakrivljenosti i dužine opterećenih vlakana konstrukcije.

Kod sedlastih membranskih konstrukcija najčešće je primenjivana kvadratna forma osnove. Rezultati ovog istraživanja su pokazali da pri korišćenju rombi ne forme osnove dolazi do povećanja maksimalnih pomeranja u odnosu na odgovarajućih kvadrat, ako se rastojanje između u viših oslonaca povećava, odnosno dolazi do smanjenja pomeranja ako se ovo rastojanje smanjuje.

Maksimalna pomeranja između u ispitivanih modela razlikuju se i do 40% pri intenzitetu sile od 1 kN. Između u rombi njih oblika osnove sa različitim odnosima dijagonala koje variraju od 1:2 do 2:1, pri čemu su simultano varirane dužine obe dijagonale, pomeranja se menjaju u manjoj meri, odnosno manje od 25% pri intenzitetu sile od 1 kN.

Prilikom povećanja veličine kvadratne osnove dolazi do nelinearnog povećanja pomeranja. Kod modela sa najvećom kvadratnom osnovom zabeleženo je i najveće pomeranje, i ono iznosi 106,9 mm pri intenzitetu koncentrisane sile od 1 kN. Dalja istraživanja u ovoj oblasti mogla bi biti usmerena ka formama osnove koje se ređe primenjuju u praksi. Takođe, istraživanja bi trebalo usmeriti ka tome da se utvrdi koliko zakrivljenost i dužina vlakana, nezavisno jedno od drugog utiču na pomeranja membrane.

U ovom istraživanju kroz promenu oblika osnove menjana su istovremeno i ova dva parametra, pa nije bilo moguće utvrditi njihov pojedinačni uticaj na pomeranja. Ishod ovog istraživanja ne treba da bude ograničavanje projekatanta na korišćenje određenih formi osnove membranskih konstrukcija, a izbegavanje drugih, jer bi se na taj način sputavao njihov kreativan doprinos. Međutim, u situacijama kada se utvrdi da su pomeranja membrane pod dejstvom koncentrisane sile prevelika, a drugim načinima nije moguće njihovo smanjivanje, treba znati da je moguće njihovo smanjivanje i promenom oblika osnove.

LITERATURA

- [1] American Society of Civil Engineers, Tensile Membrane Structures, Standards ASCE/SEI 55-10, Structural Engineering Institute, 54 p, 2010.
- [2] Forster B, Mollaert M, European design Guide for tensile surface structures, Tensinet, Brussels, 354 p, 2004.
- [3] Bridgens B. N, Birchall M, Form and function: The significance of material properties in the design of tensile fabric structures, Engineering Structures, Vol. 44, p. 1-12, 2012.
- [4] Gosling P. D, Bridgens B. N, Zhang L, Adoption of reliability approach for membrane structure analysis, Structural Safety, Vol. 40, p. 39-50, 2013.
- [5] Gosling P. D, Bridgens B. N, Albrecht A, et al., Analysis and design of membrane structures: Results of a round robin exercise, Engineering Structures, Vol. 48, p. 313-328, 2013.
- [6] Mohamed H. I, Zanelli A, Camers J. The structural behavior of PTFE/Glass fabric structures integrating flexible photovoltaic modules, VI International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures – Structural Membranes 2013, p. 290-299, 2013.
- [7] Berger H, Form and function of tensile structures for permanent buildings, Engineering Structures, Vol. 21, p. 669-679, 1999.
- [8] Wu T, Ting E, Large deflection analysis of 3D membrane structures by a 4-node quadrilateral intrinsic element, Thin-walled Structures, Vol. 46, p. 261-275, 2008.
- [9] Katsikadelis J. T, Tsiatas G. C, The analog equation method for large deflection analysis of heterogeneous orthotropic membranes: a boundary-only solution, Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol. 25, p. 655-667, 2001.
- [10] Katsikadelis J. T, Tsiatas G. C, Large deflection analysis of elastic membranes, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 65, p. 264-294, 2006.
- [11] Selvadurai A. P. S, Deflections of a rubber membrane, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 54, p. 1093-1119, 2006.
- [12] Milošević V, Primena tekstilnih konstruktivnih materijala u arhitekturi, Tekstilna industrija, Vol. LX, broj 2, str. 33-39, 2013.
- [13] Milošević V, Dependence of membrane deflection on the position and intensity of point loads, Structural Engineering International, Vol. 2015, No. 1, p. 20-25, 2015.
- [14] Milošević V, Kostić D, Mijović D, Optimizacija membranskih konstrukcija inkrementalnim nanošenjem proračunskog opterećenja snegom, Tehnika, vol. 70, no. 1, p. 29-35, 2015.
- [15] Sofistik AG, Sofistik 2016, Oberschleissheim, 143 p, 2015.
- [16] Bletzinger K. U, Ramm E, Structural optimization and form finding of light weight structures, Comput Struct., Vol. 79, p. 2053-2062, 2011.
- [17] Bonet J, Mahaney J, Form finding of membrane structures by the updated reference method with minimum mesh distortion, International Journal of Solids and Structures, Vol. 38, p. 5469-5480, 2001.
- [18] Koohestani K. Nonlinear force density method for the form-finding of minimal surface membrane structures, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, Vol. 19, p. 2071-2087, 2014.

SUMMARY

INFLUENCE OF THE MEMBRANE STRUCTURE PLAN SHAPE ON THE DISPLACEMENTS UNDER POINT LOAD

Deformations of membrane structures under external loads are much more prominent compared to other structures and structural materials. External area loads cause large displacements and redistribution of internal tension forces. Point loads have a less significant impact on changes of internal forces, but a more significant role in creation of local deformations. Previous researches have shown the influence of position and intensity of point loads on the deformations of membrane structures. The aim of this research is to investigate the influence of plan shape of the membrane structure on the displacements under point load. The influence of rhombic shaped plans with different diagonal lengths and ratios is explored. The research is conducted on numerical models in the specialized software Sofistik. Models are loaded with point loads in the point where diagonals intersect and the results are compared.

Key words: *membrane structures, displacements, plan shape, numerical model, point loads, tensile structures*